

УДК 624.042:624.016

**А.В. Гасенко, ст. викл., канд. техн. наук**

*Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

**С.О. Джирма, доц., канд. техн. наук, В.В. Дарієнко, ас., канд. техн. наук**

*Кіровоградський національний технічний університет*

## Чисельне дослідження вузлів сталезалізобетонних колон, виконаних із швелерів, з елементами перекриття

Викладено результати чисельного розрахунку методом скінченних елементів напружено-деформованого стану вузлів сталезалізобетонних колон із швелерів з монолітним залізобетонним перекриттям без застосування капітелей та вузлів колон з сталевими балками з швелерів.  
**сталезалізобетонні колони, напружено-деформований стан, безкапітельний вузол**

У останні роки сталобетонні колони все більш частіше застосовуються як конструктивний стиснутий елемент у збірно монолітних залізобетонних каркасах цивільних та промислових будівель. Це можна пояснити вдалим поєднанням сталі та бетону так як виникають взаємовигідні умови для їх роботи під навантаженням [7]. Бетонне ядро підвищує місцеву стійкість і несучу здатність металевої оболонки та відпадає необхідність захищати її від корозії з внутрішньої сторони. Металева оболонка створює сприятливі умови для твердіння бетонної суміші, уповільнює утворення мікротріщин у бетоні при дії граничних зусиль чим зумовлює об'ємний напружений стан бетонного осердя, захищає бетон від зовнішніх механічних впливів. Проста технологія виготовлення, забезпечення високої швидкості будівництва при зведенні збірномонолітних будівель, значна економія металу за рахунок підвищення загальної несучої здатності конструкції застосовуючи бетон, більша порівняно із металевими конструкціями вогнестійкість роблять сталобетонні колони особливо вигідними [2].

Для поєднання перекриттів із залізобетонними колонами та забезпечення жорсткості рами всієї будівлі використовують збірні чи монолітні капітелі. Проте використання капітелей у житлових приміщеннях має досить низький естетичний та технологічний рівень. Вузли поєднання трубобетонних колон з іншими елементами будівлі (бази та оголовки колон, консолі для спирання балок), розробляються сучасними науковими школами. Існує ряд досліджень роботи трубобетонних конструкцій [4], напружено-деформованого стану вузлів конструкцій та місць концентрації напружень в них [1, 3]. Розрахунок і конструювання вузлів сталобетонних конструкцій на сьогодні розроблені недостатньо, що сповільнює впровадження їх у практику будівництва.

Розрахунки й проектування каркасів із сталезалізобетону ведуться в основному згідно з діючими СНиП II-23-81\* "Стальные конструкции", СНиП 2.03.01-84\* "Бетонные и железобетонные конструкции", СНиП 2.05.03-84 "Мосты и трубы" та посібниками і рекомендаціями до них. У західноєвропейських країнах при проектуванні сталезалізобетонних конструкцій керуються Eurocode 4 "Common Unified Rules for Composite Steel and Concrete Structures European Committee for Standardization". Зростаюче використання більш потужної обчислювальної техніки за допомогою прикладних програм надає можливість реально моделювати роботу складних сталезалізобетонних конструкцій. За останні десятиліття проводяться дослідження напружено-деформованого стану вузлів поєднання сталобетонних колон прямокутного поперечного перерізу з сталевими балками

переkritтя чи монолітним залізобетонним переkritтям, особливостей їх роботи [6], розробляються рекомендації щодо проектування вказаних конструкцій.

Чисельне моделювання напружено-деформованого стану (НДС) моделей зразків було виконано за допомогою програмного комплексу скінченно-елементного аналізу MSC NASTRAN for Windows на електронно-обчислювальних машинах. Цю програма скінченно-елементного аналізу визнано лідером у даному напрямку із-за повного огляду явищ різної фізичної природи досліджуваних матеріалів.

Конструкція безкапітельного вузла (першого досліджуваного вузла) – поєднання сталезалізобетонної колони прямокутного поперечного перерізу із залізобетонним монолітним переkritтям показана на рисунку 1 [5]. Розміри вузла були прийняті згідно проекту громадської будівлі торгово-розважального центру. Колона виконана із двох швелерів 30 заповнених бетоном класу В25. Монолітне залізобетонне переkritтя товщиною 200 мм виконане із бетону класу В30.

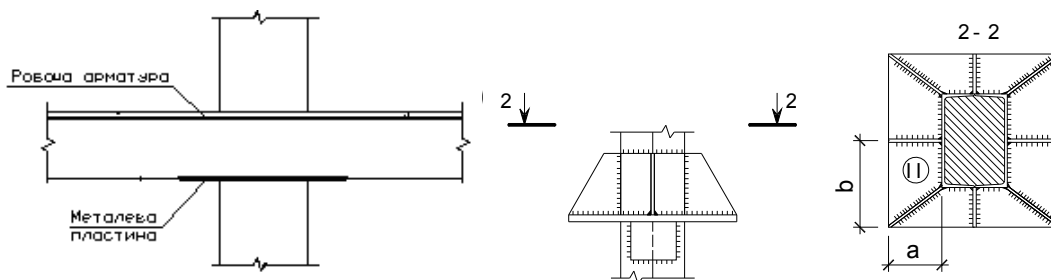


Рисунок 1 - Розрахункова схема вузла сталезалізобетонної колони із залізобетонним монолітним переkritтям та конструкція опорної плити вузла

Другий досліджуваний вузол – вузол примикання сталезалізобетонного ригеля до трубобетонної колони. На рисунку 2 наведено креслення цього вузла.

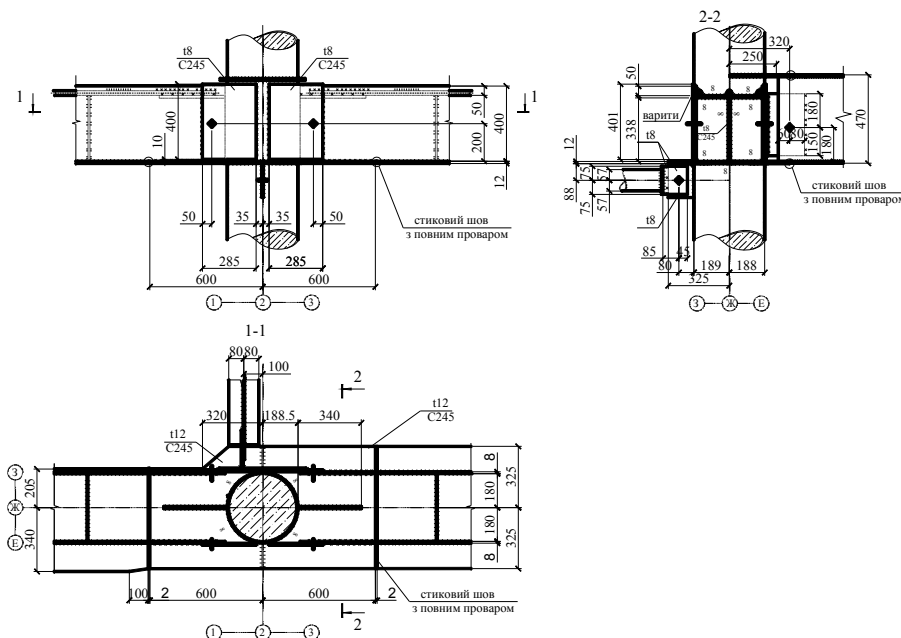


Рисунок 2 - Розрахункова схема вузла поєднання сталезалізобетонного ригеля до трубобетонної колони

Геометричні моделі досліджуваних віртуальних зразків створювалися безпосередньо в підпрограмі Femar програмного комплексу. Сталева та бетонні частини створювалися окремо. Обов'язково виконувався контроль геометричних характеристик

створеного плоского перерізу: площі, положення центра ваги, моментів інерції, моментів опору і радіусу інерції відносно головних осей. У результаті порівняння геометричних характеристик модельованого перерізу та даних із сортаменту прокатних профілів виявлена розбіжність складає до 0,5%, що в межах допусків на прокат. Для прикладу, створена геометрія моделі вузла труобетонної колони із ригелем показана на рисунку 3.

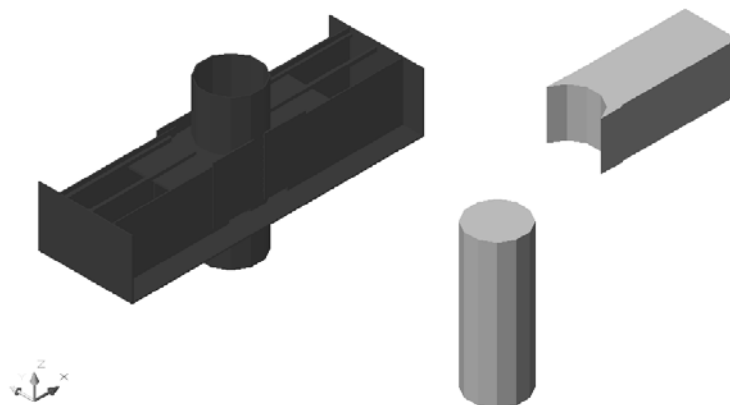


Рисунок 3 – Об’ємна модель вузла зі сталі та окремо бетонні елементи

Матеріали моделі – сталь і бетон – задавалися окремо, як ізотропні. Всі властивості матеріалів задавалися у вигляді скалярних величин. Значення фізико-механічних характеристик матеріалів (модуль пружності Юнга  $E$  і коефіцієнт поперечних деформацій  $\nu$ ) та закону деформування ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) бралися згідно діючих норм.

При виборі типу та розмірів скінченних елементів, на які розбивалась утворена модель, враховано час створення об’ємної скінченно-елементної сітки, необхідний дисковий простір для проведення персональним комп’ютером розрахунку, точність та збіжність отриманих результатів при розрахунку моделей розбитих різними елементами. Після виконання серії розрахунків однієї і тієї ж моделі, розбитої різними об’ємними елементами (гексаедрами чи тетраедрами із стороною від 0,5 до 10% від найбільшого габаритного розміру зразка), та після порівняння збіжності отриманих результатів, вирішено розбивати модель на тетраедри із стороною рівною десятій частині висоти використовуваного швелера для металевої оболонки колони модельованого вузла. При таких розмірах скінченно-елементної сітки відхилення від середнього значення напружень порахованого по результатам всіх розрахунків складає до 1,5%, а необхідні ресурси персонального комп’ютера для проведення розрахунку майже однакові у порівнянні з більш крупною сіткою.

Після розбиття об’ємних деталей модельованого вузла (сталеві та бетонні частин) на скінченні елементи проводилося об’єднання співпадаючих вузлів на гранях сталі та бетону. На рисунку 4 показано вигляд модельованого вузла сталезалізобетонної колони із монолітним залізобетонним перекриттям після розбиття сталеві частини на скінченні елементи.

Згідно розрахункової схеми прикладеним навантаженням до вузла сталезалізобетонної колони із монолітним залізобетонним перекриттям було рівномірно-розподілене зусилля по монолітному перекриттю.

До вузла труобетонної колони із ригелем було прикладене рівномірно-розподілене по довжині ригеля навантаження. Тому прикладеними навантаженнями до вузла були: два згинаючі моменти, прикладені до частин балок, та поздовжня сила, прикладена до верхнього торця колони.

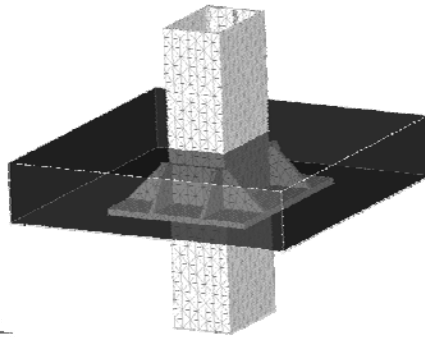
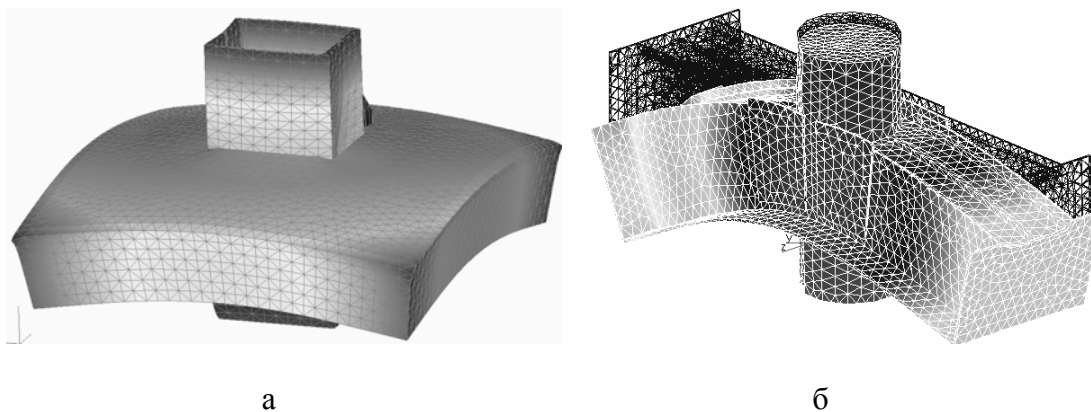


Рисунок 4 – Загальний вигляд моделі вузла після розбиття сталевої частини на скінченні елементи

Нижній частині колони було заборонено поступальні й обертальні переміщення по всіх трьох осях. Верхній частині колони – поступальні переміщення у площині перпендикулярній поперечному перерізу колони та обертальні переміщення по всіх трьох осях. Така схема завантаження та закріплення вузла максимально наблизила модельований вузол до його реальної роботи в каркасі будівлі.

У результаті проведення розрахунків методом скінченних елементів за допомогою електронно-обчислювальних машин були отримані графіки розподілу відносно головних осей деформацій і напружень на поверхні моделей та їх числові значення із вказуванням екстремумів. Виконано детальний аналіз місць концентрації напружень у моделі вузла. Вигляд моделей вузлів після деформування показано на рисунку 5.



а – сталезалізобетонної колони із монолітним перекриттям; б – трубобетонної колони із ригелем

Рисунок 5 – Схема деформування вузла

На рисунку 6 показано вигляд металевої частини вузла поєднання колони з монолітним перекриттям – колони та опорного столика з ребрами жорсткості – після прикладення навантаження. На стовпчику справа показані величини напружень на поверхні металевої частини вузла згідно кольорового відтінку. Напруження досягають найбільших значень у зварних швах, що приєднують опорну пластину до швелерів колони.

Виконано аналіз значень нормальних та дотичних напружень по всіх головних осях моделі вузла. Аналізуючи нормальні напруження по осях  $x$  та  $y$  (осі перекриття), відмічено концентрацію розтягуючих напружень у фасонних листах, що приєднують опорну пластину до сталобетонної колони. Порівняно з напруженнями в інших частинах вузла, концентрація напружень у розтягнутих зварних швах приєднання фасонних листів до колони сягає майже подвійно збільшеного значення.

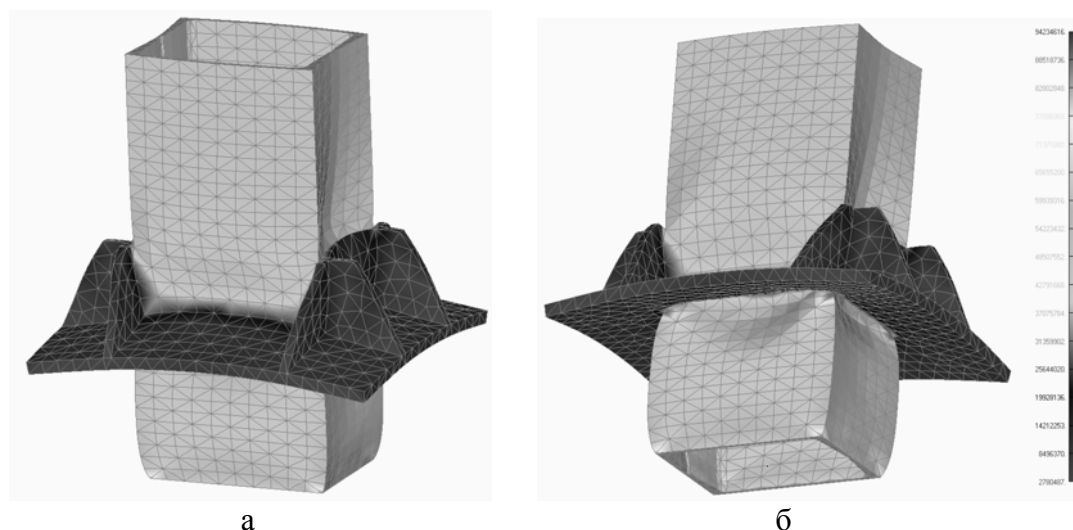


Рисунок 6 – Схема деформування сталеві частини вузла колони з монолітним перекриттям

Нормальні напруження до поздовжньої осі колони приймають максимальних значень у колоні. Проте слід відмітити, що в колоні ці напруження виникають від стискаючої сили, а майже вся опорна пластина сприймає навантаження розтягу. Напруження розтягу у пластині приблизно в 6 разів менші за напруження стиску в колоні.

Найбільші дотичні напруження, як і передбачалось, виникають у місцях приєднання опорної конструкції вузла до колони. Це пояснюється максимальними значеннями поперечної сили у монолітній плиті у вказаних точках.

На рисунку 7 показано розподіл головних напружень на поверхні вузла трубобетонної колони з ригелем. Аналізуючи нормальні напруження по осі  $x$  (поздовжня вісь балки), відмічено концентрацію розтягуючих напружень у фасонних листах, що приєднують стінки полиці ригеля до трубобетонної колони. Порівняно з напруженнями в інших частинах вузла, концентрація напружень у верхніх розтягнутих зварних швах приєднання листа балки до фасонного листа, у декілька разів більші. Нормальні напруження по осі  $z$  (поздовжній осі колони) від стискаючої сили у колоні та напруження від згинаючого моменту у балках у місцях приєднання до колони майже однакові.

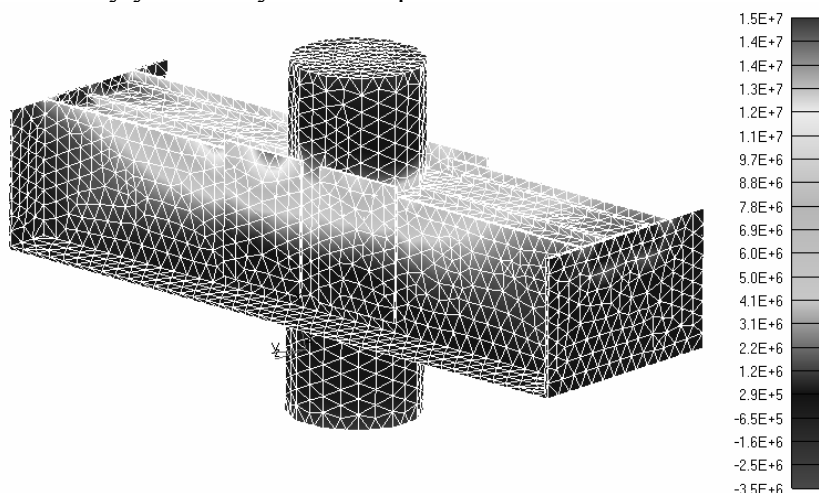


Рисунок 7 – Розподіл головних напружень на поверхні вузла колони з ригелем

Аналізуючи отримані результати деформацій вузла, особливої уваги викликають деформації вздовж вісі  $z$ , оскільки навантаження також прикладене вздовж цієї вісі. Максимальне переміщення становить 1,4 мм. Проаналізувавши деформації окремо по осям, а також максимальні загальні деформації можна сказати, що вони підтверджують

висновки зроблені по напруженням оскільки максимальні деформації виникли у фасонках накладки. При рівномірно розподіленому навантаженні на балки, максимальні загальні деформації досягають 0,15 мм (див. рис. 5, б).

З отриманих результатів дослідження можна зробити висновок, що використання комп'ютерної програми для моделювання напружено-деформованого стану вузла дозволив виявити місця на конструкції із найбільшими напруженнями. Під час порівняння збіжності отриманих результатів при розрахунку моделей вузла, розбитих різними об'ємними скінченними елементами (тетраедрами чи гексаедрами) із різними розмірами, вирішено розбивати моделі зразків на тетраедри із стороною приблизно 1/10 від поперечного розміру колони.

Безкапітільний вузол з'єднання сталебетонної колони з монолітним залізобетонним перекриттям є досить простим при проектуванні, монтажі та експлуатації. При його застосуванні забезпечується необхідна жорсткість каркасу всієї будівлі при одночасному збільшенні корисного житлового об'єму, у порівнянні із стандартним вузлом з капітеллю. Така конструкція вузла забезпечує приблизну рівномірність всіх елементів вузла (колони, монолітного перекриття, опорної металевої конструкції та зварних швів).

Розрахунок вузла сталезалізобетонного ригеля з трубобетонною колоною реальних конструкцій каркасу громадської будівлі за допомогою програмних комплексів скінченно-елементного аналізу у тривимірній постановці встановив розподіл напружень на поверхні вузла. Місцями концентрації напружень виявилися місця приєднання фасонного накладного листа до ригеля, а також зварні шви, що з'єднують вказані елементи. Тому під час монтажу сталезалізобетонного ригеля до колони необхідно ретельно контролювати якість виконання зварних швів фасонного листа до ригеля.

## Список літератури

1. Воскобійник С.П. Напружено-деформований стан вузлів з'єднання трубобетону з залізобетоном при позакентровому стиску та згину: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Воскобійник Сергій Павлович. – Полтава: 2002. – 150 с.
2. Клименко Ф.Е. Сталебетонные конструкции с внешним полосовым армированием / – К.: Будівельник, 1984. – 88 с.
3. Клыков В.М. Экспериментально-теоретические исследования рамных узлов конструкций из гнутых профилей / В.М. Клыков, Г.Я. Эстрин // Вопросы совершенствования строительства. – Донецк: 1971. – С. 31–40.
4. Назаров О.В. Напружено-деформований стан трубобетонних елементів при місцевих силових впливах / О.В. Назаров: Автореферат дис. канд. техн. наук. – Київ, 2004. – 20 с.
5. Пат. 25636 Україна, МПК (2006) Е 04 В 5/10. Безфасонний вузол з'єднання сталебетонних колон із балками зі швелерів / заявники Семко О.В., Гасенко А.В. ; власник Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – № u 2007 04663 ; заявл. 26.04.07 ; опубл. 10.08.07, Бюл. № 12. – 4 с.
6. Семко О.В. Особливості конструювання і розрахунку вузлів сталебетонних колон з швелерів / О.В. Семко, А.В. Гасенко // Будівельні конструкції: зб. наук. пр. – К. : НДІБК, 2006. – Вип. 65. – С. 183–186.
7. Стороженко Л.І. Сталезалізобетонні конструкції / Л.І. Стороженко, О.В. Семко. – Полтава, 2001. – 55 с.

Одержано 16.08.10